

Pētījuma gala rezultātu prezentācija
Latvijas elektrisko un optisko iekārtu ražošanas nozares kompetences centram
Projekts Nr. 1.2.1.1/18/A/006

Pētījums Nr. 1.6. “Analogo elementu pētījumi, kas izmantoti Hi-End audio produktu ražošanā”

AS «ALFA RPAR»

Aleksandrs Zaslavskis

14.07.2022.

NACIONĀLAIS
ATTĪSTĪBAS
PLĀNS 2020



EIROPAS SAVIENĪBA
Eiropas Reģionālās
attīstības fonds

IEGULDĪJUMS TAVĀ NĀKOTNĒ

Īstenošanas termiņš un budžets

1. Pētījuma kopējais īstenošanas termiņš [04.2019.-05.2022.]
2. Pētījuma budžets (attiecināmās izmaksas – 851 548.00 EUR; grants – 564 094.00 EUR)

3. Pētījuma galvenie uzdevumi un sasniedzamie rezultāti

- 3.1 Operacionālā pastiprinātāja (OpAmp) izstrāde Hi-End audio pielietošanai
- 3.2 Digitālā-analogā pārveidotāja (DAC) izstrāde Hi-End audio pielietošanai
- 3.3 Vakuuma tranzistora izstrāde audio pielietošanai

3. High-End

“High End — tas ir mārketinga termins, kas apzīmē augstāko (elites) klasi skaņas pastiprināšanas aparātiem un programmatūrai, kas paredzēts *audiofilu* augsto prasību apmierināšanai. Tā ir ļoti dārga un ekskluzīva skaņas aparatūra, kas tiek ražota mazās sērijās vai pat pa vienai. Nereti to dara paši *audiofili*.”

Atšķirībā no Hi-Fi mūsdienu radioelektronikā, lai sprastu “High End”, pietrūkst reglamentējošu standartu vai citur raksturlielumu, kas spētu kvalificēt “High End”. Ražotāju deklarētās High-End klases preces ietver tikai augstākās kvalitātes komponentes, kuru izmantošana daudzos gadījumos ir ekonomiski nepamatota. Izstrādājot High-End klases izstrādājumus, tiek pielietotas pašas mūsdienīgākās, nereti revolucionārās idejas, lai sasniegtu maksimāli iespējamo pozitīvo rezultātu. Nereti tie ir ekonomiski nepamatoti ne tikai priekš masveida ražošanas, bet arī nelielas partijas izgatavošanai.

Mārketinga apraksts Hi-End produktam varētu būt tāds:

“Kas tā ir High-End aparatūra? Kas tā ir high-end skaņa? Tas ir tad, kad aizmirsti par skaņas sistēmu, kad telpu, kurā klausies, burtiski ieņem izpildītājs. Tas ir tad, kad jūs jūtat, ka komponists un izpildītājs runā ar jums cauri laikiem un no attāluma. Tā ir neparasta pācēluma sajūta muzikālās kulminācijas laikā. Tie ir neaprakstāmi emociju “amerikāņu kalniņi”, kuras komponists kaut kādā brīnumainā veidā ir spējis iekodēt skaņu kombinācijā. Tā ir materiālās pasaules pazušana, kad paliek tikai jūsu apziņa un mūzika”.

Tādā veidā var noteikt Hi-End definīciju – tās ir sistēmas, kas izveidotas priekš klausītāja, kas augstu novērtē augstas kvalitātes audiosistēmas skanējumu un tās spēju maksimāli precīzi veidot zāles un skatuves, kurā tika veikts ieraksts, muzikālo atmosfēru.

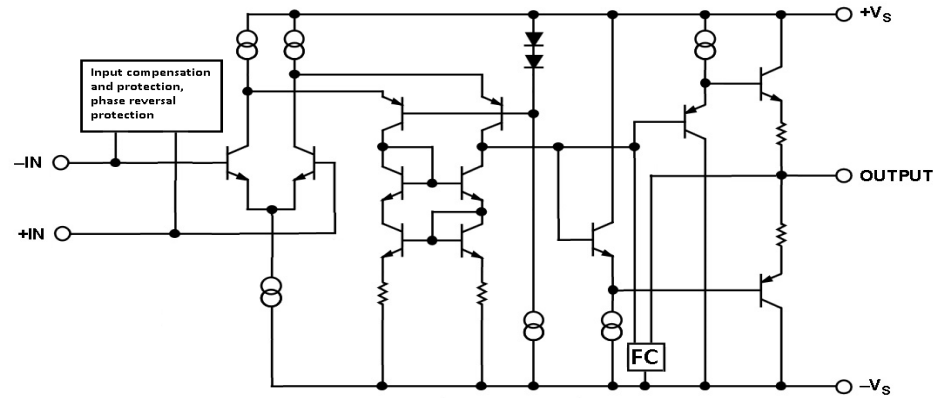
Daudzos gadījumos, lai novērtētu Hi-End aparatūru, netiek izmantoti tehniskie raksturlielumi, bet gan ekspertu novērtējumi - tā saucamās noklausīšanās. Protams, ka eksperta autoritāte tieši ietekmē izstrādājuma tirgus vērtību. Tomēr vērts ir pieminēt faktu, kad pie audio sistēmu noklausīšanās ar vienādiem tehniskiem parametriem tiek novēroti pilnīgi dažādi skanējumi. “Nevaru aprakstīt, bet jūtu atšķirību”. Tas liecina par mērāmo parametru sistēmas nevienmērību.

3.1 Operacionālā pastiprinātāja (OpAmp) izstrāde Hi-End audio pielietošanai

Izstrādātas minimālās pamatprasības Hi-End Op-Amp:

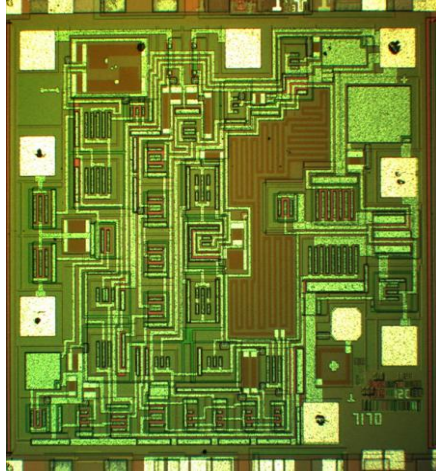
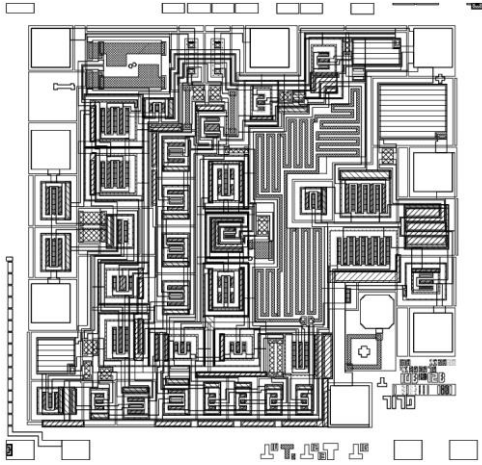
- Visiem parametriem jābūt noteiktiem uz aktīvo un kapacitatīvo jaudu. Turklāt kapacitatīvā slodzei jābūt ne mazākai kā 200 pF. Visu parametru raksturošanai jānotiek pie iespējami lielas kapacitatīvās slodzes.
- Nelineārām novirzēm jābūt noteiktām pie izejas sprieguma - $V_{rms} > 7 \text{ V rms}$ (10V amplitūda), pie aktīvajās-kapacitatīvās (vairā nekā 300 pF) slodzes ar frekvenci 20 un 40 kHz.
- Jānosaka fāzes rezerves. Kā minimums tam jābūt ne mazākam par 60° pie aktīvās un kapacitatīvās slodzes. Tas dod stabilitāti pārejas procesā. Projektējot parastus OpAMP, izstrādātāji kā kompromisu izvēlas fāzes rezerves 15-20°.
- Jānosaka pārsitienu pie maza signāla priekš aktīvi-kapacitatīvās slodzes.
- Izejas sprieguma pieaugšanas ātrumam jābūt noteiktam priekš atkārtotāja režīma aktīvi-kapacitatīvās slodzes (vairāk nekā 100 pF) un vairāk nekā 25 V/μSec.
- Izejas kaskādei jādarbojas režīmā, kas tuvs A klasei.
- Izejas sprieguma pieaugšanas ātrums 25 V/μSec un kapacitatīvai slodzei 500 pF pastiprinātāja izejas strāva drīkst būt vairāk nekā 15 mA.
- Kā obligāts nosacījums pielietošanai reālos apstākļos - jābūt nodrošinātai aizsardzībai pret fāzes apgriešanos

Izstrādāta OpAmp struktūra



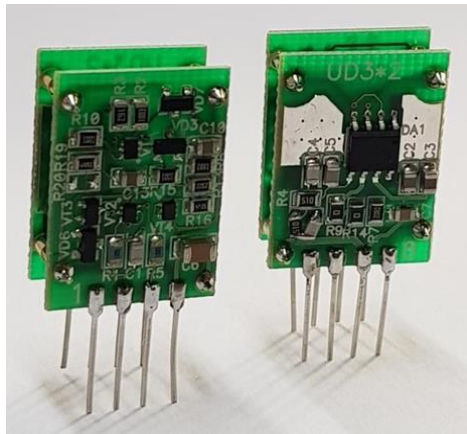
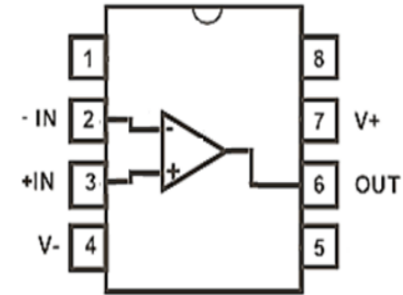
- tika izvēlēts bipolārais pastiprinātājs ar joslu lielāku par 120 MHz un pastiprināšanas ātrumu $150\text{V}/\mu\text{s}$. Tādi bāzes parametri ļauj izveidot hibrīdo pastiprinātāju ar lielu rezervi fāzē (ar augstu noturību).
- Attēlotajā struktūrā ļauj sasniegt nepieciešamo frekvenču korekciju, un speciāli izstrādātais ieejas ķēžu kompensācijas bloks (Input compensation) nodrošina ieejas strāvu kompensēšanas funkciju, aizsardzību pret fāzes pagriešanos, speciālas korektīvās ķēdes priekš atgriezeniskās saites ķēdēm.
- Pastiprinātājs izstrādāts pēc bipolārās papildinošās tehnoloģijas ar integrētu plānās kārtiņas rezistoru, kas kalibrēts ar lāzeru.

Topologija, kristāls, prototipi, rūpnieciskie dizaini AS401, AS402

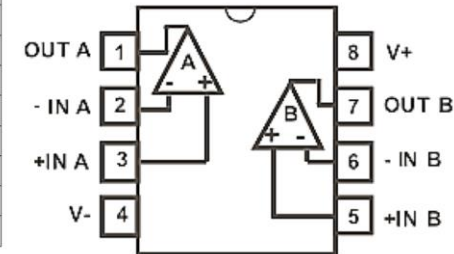


Pin information

Pin name	Pin number	Description
-IN	2	Inverting input
+IN	3	Non-inverting input
NC	1,5,8	No internal connection
OUT	6	Output
V-	4	Negative power supply
V+	7	Positive power supply



Pin name	Pin number	Description
OUT A	1	Output_A
-IN A	2	Inverting input_A
+IN A	3	Non-inverting input_A
V-	4	Negative power supply
+IN B	5	Non-inverting input_B
-IN B	6	Inverting input_B
OUT B	7	Output_A
V+	8	Positive power supply



Kopsavilkums par atšķirīgajām īpašībām:

<https://www.alfarzpp.lv/eng/sc/AS401.pdf>

<https://www.alfarzpp.lv/eng/sc/AS402.pdf>

zems ieejas sprieguma troksnis (mazāk nekā 2 nV/√Hz)

izteikti zemi kopējie harmoniskie traucējumi un troksnis (RI = 600 Ohm

0,00015 % pie 20 kHz 0,00036 % pie 40 kHz

Unity-gain stabils pie RI=600 Ohm CI=1000 pF

Fāzes robeža pie G=+1 & RI = 600 Ohm bez ārējas korekcijas:

125° pie CI=100 pF 60° pie CI=330 pF

Sprieguma maiņas ātrums G=+1 30 V/μs & RI = 600 Ohm CI = 330 pF

zems ieejas offset spriegums (ne vairāk kā 250μV)

joslas platums > 35MHz

plašs barošanas diapazons +9V to +36V (±4,5 V -±18 V))

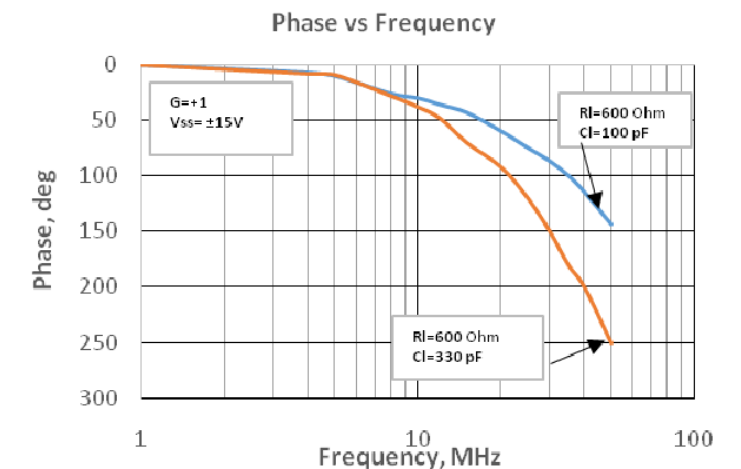
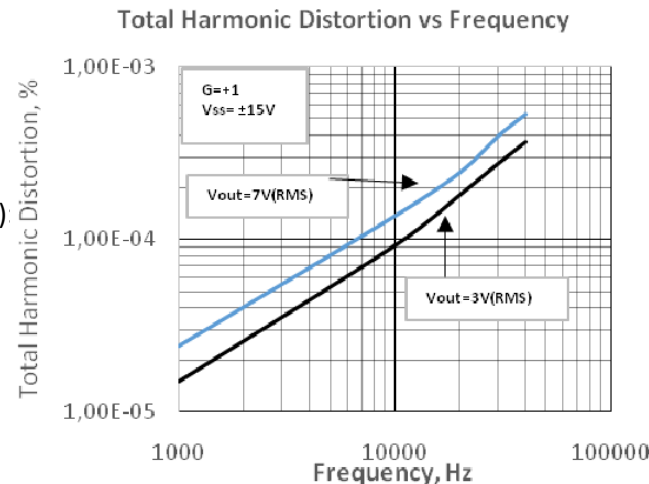
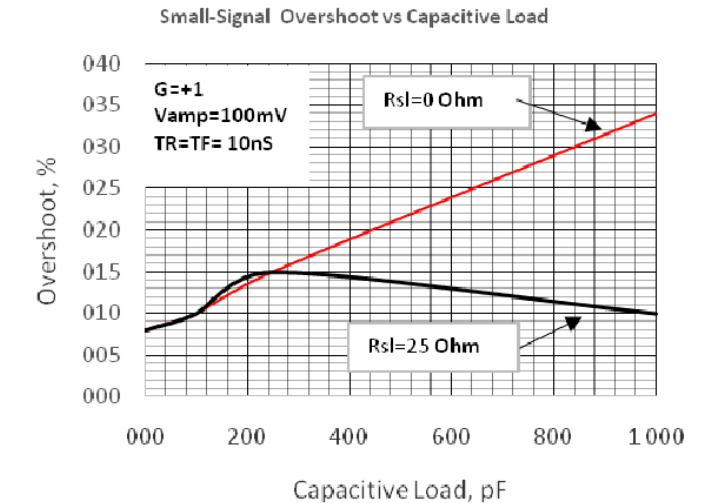
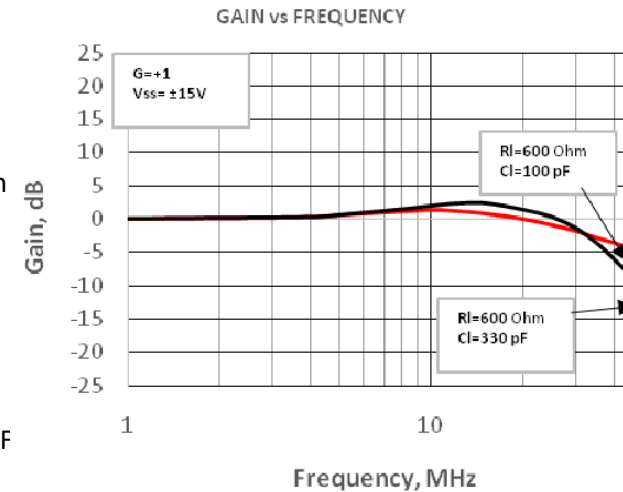
ieejas strāva < 1uA

lineārs izejas līmenis A klase

zems mazā signāla pārsitiens ar kapacitatīvo slodzi (100mV izejas solis)

- 8% RI=600 Ohm, Rsl=0 Ohm, CI=100 pF;
- 10% RI=600 Ohm, Rsl=0 Ohm, CI=250 pF;
- 30% RI=600 Ohm, Rsl=0 Ohm, CI=1000 pF;
- 15% RI=600 Ohm, Rsl=25 Ohm, CI=1000 pF

bez fāzes pagriešanās



Atsauksmes:

- The sound of the DAC with AS401 in the subtractor is more "vivid", "pure" and "spatial" in comparison with both OPA1611 and ADA4627. It has a "velvet", "unobtrusive", "very analogous" sound with a good elaboration of the rhythmic component of musical works and timbre correct reproduction of the sound of "natural" instruments, especially violins and cellos. Quiet sounds are well reproduced over the background of loud ones, moreover there is a good effect of "silence" between individual sounds.

DAC skaņa ar AS401 ir "spilgtāka", "tīrāka" un "telpiskāka", salīdzinot gan ar OPA1611, gan ADA4627. Tam ir "samtaina", "neuzbāzīga", "ļoti analoga" skaņa ar labu muzikālo darbu ritmiskās sastāvdaļas izstrādni un tembrāli korektu "dabisko" instrumentu, īpaši vijoļu un čellu, skanējumu. Klusas skaņas labi tiek atskaņotas uz skaļo fona, turklāt starp atsevišķām skaņām ir labs "klusuma" efekts.

- The comparison was performed by replacing the operational amplifiers in the post-DAC AK4497 filter. With MUSES02, the sound can be characterized as bright, sonorous with an average separation of instruments, scale sounds and dynamics are good, but not outstanding.

With AS402 (ALFA), the sound became more transparent, with a lot of small nuances and high resolution. Dynamic contrasts are very expressive and emotional. The low-frequency range is detailed and fundamental. The music scene has clear spatial outlines with tangible images and the air between them. For example, the drum kit is very natural, You can clearly hear which drum or cymbal was hit by drumstick, to the left - to the right, higher - lower, closer - further.

Salīdzinājums tika veikts, nomainot darbības pastiprinātājus filtrā pēc DAC AK4497. Ar MUSES02 skaņu var raksturot kā spilgtu, skanīgu ar vidēju instrumentu nošķirtību, skalas skaņas un dinamika ir laba, bet ne izcila.

Ar AS402 (ALFA) skaņa kļuva caurspīdīgāka, ar daudzām sīkām niansēm un augstu izšķirtspēju. Dinamiskie kontrasti ir ļoti izteismīgi un emocionāli. Zemo frekvenču diapazons ir detalizēts un fundamentāls. Mūzikas ainai ir skaidras telpiskas kontūras ar taustāmiem attēliem un gaisu starp tiem. Piemēram, bungu komplekts ir ļoti dabisks, Var skaidri dzirdēt, uz kuru bungu vai šķīvju sita stilbiņš, pa kreisi - pa labi, augstāk - zemāk, tuvāk - tālāk.

Tālāka attīstība

Novērtējot iepriekšējos posmos izstrādātās OpAmp struktūru un izgatavojamību, tika atklāti šādi trūkumi:

- ievērojama ieejas strāva, kas paredzētās regulēšanas procedūras laikā nevar tikt garantēta, ka darba temperatūras diapazonā samazināsies ievērojami mazāk par 1 μA . Tas sašaurina iespējamās pielietojuma jomas.
- ieejas strāvas regulēšanas procedūras sarežģītība, darbietilpība. Liels skaits papildu ārējo komponentu, kas atrodas ievērojami atšķirīgos termiskajos apstākļos.
- Shēmatiski, ieejas strāvas kompensāciju nevar saistīt ar OpAmp pastiprinātāja ieejas kaskada darbības strāvu, jo tā nav pieejama ārējām shēmām un attiecīgi tās novirzi nevar ņemt vērā.
- fāzes maiņas aizsardzība, kas veidota uz ārējiem elementiem, prasa lielu skaitu
- kopā liels skaits ārējo elementu (40 elementi), kas sarežģī korpusa un siltuma izlietnes dizainu.

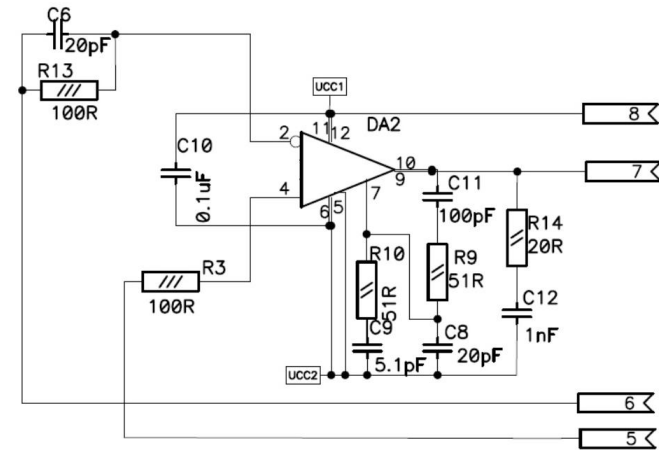
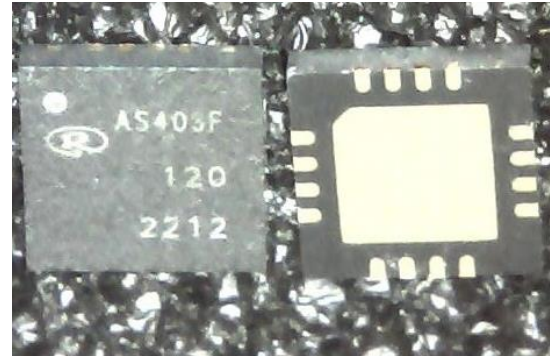
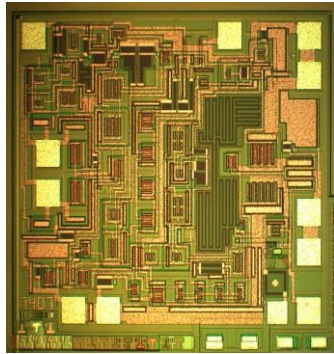
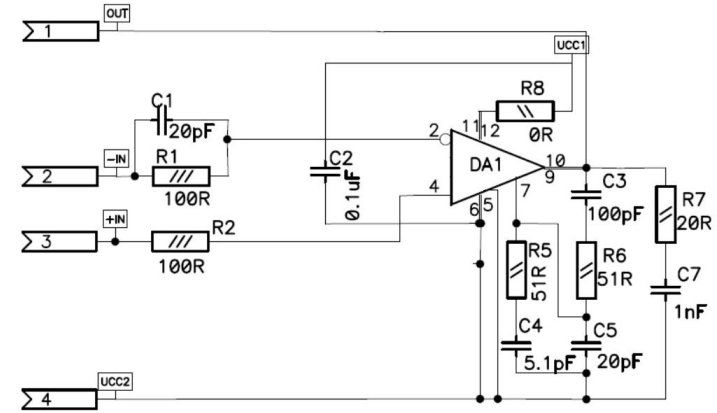
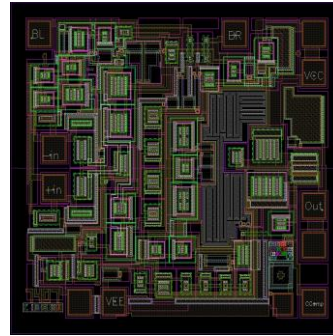
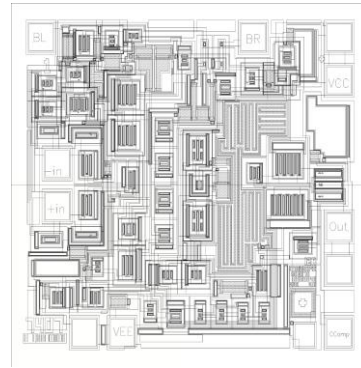
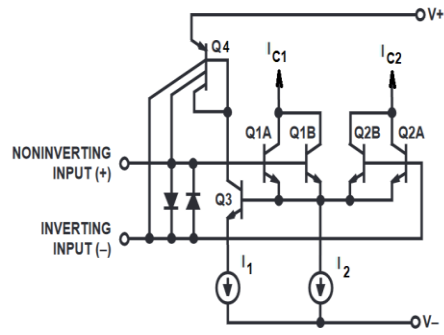
Lai atrisinātu uzdevumus, tika nolemts labot risinājumus. Lai to izdarītu, OpAmp shēma tika pārveidota, un kā vienu no konstruktīva risinājuma iespējām tika nolemts izmantot QFN16 4 * 4 0,5 mm korpusi.

Tas ļauj:

- samazināt kopējo elementu skaitu hibrīdā pastiprinātājā no 40 līdz 14,
- novērst parametru regulēšanu hibrīda mikroshēmas montāžas laikā un pārnest to uz plāksnīšu testēšanas stadiju (apvienojot ar citu elementu lāzerregulēšanu)
- QFN korpusi ievērojami samazina termisko pretestību un vienkāršo mikromontāžas dizainu.

Rezultātā – modificētais OpAmp - AS403 un AS404 dubultā versija

AS403 - ieejas strāvas kompensācija, topoloģija, kristāls, montāža QFN 4 * 4 16 0,5 mm, AS404 shēma



AS403 iepriekšējais novērtējums

AS403 bija iespējams saglabāt visus AS401/AS402 dinamiskos parametrus, kamēr:

- atrisināt problēmu ar efektīvāku siltuma izkliedi (QFN korpus)
- samaziniet ārējo komponentu skaitu līdz 11
- samaziniet ievades strāvu IN- ieejā līdz 10 nA, kas paplašina pielietojumu strāvas-spieguma pārveidotājos klasiskajos audio DAC

3.2 Digitālā-analogā pārveidotāja (DAC) izstrāde Hi-End audio pielietošanai

Posms 1

Aktivitātes ietvaros tika izgatavots 18 izlāžu DAC uz digitālā vadošā kristāla M145-4-4 bāzes (ražots AS “Alfa RPAR”). Kā rezistīvā matrica tika izmantota eksperimentālā izstrāde – matrica, kas izgatavota pētījuma “Augstas pretestības rezistīvo slāņu pētījums” ietvaros.

Uz šo kristālu bāzes tika veikta hibrīda 18 izlāžu DAC komplektēšana.

Specializētais kristāls M154-4-4 tiek izmantots, lai izgatavotu DAC ar augstu izlādes spēju. Tam ir ieejas reģistrs, izlāžu dešifrators, režīmu vadības shēma un īpaši saskaņotas izejas atslēgas. To saskaņošana ir izpildīta tādā veidā, ka katrai izlādei sprieguma kritums uz katru atslēgu ir identisks, neskatoties uz to, ka katras nākamās izlādes punkti ir divreiz mazāki par iepriekšējo. Tāda struktūra domāta izmantošanai kopā ar rezistīvo matricu, kas tiek izveidota un pielāgojas neatkarīgi no vadošā kristāla.

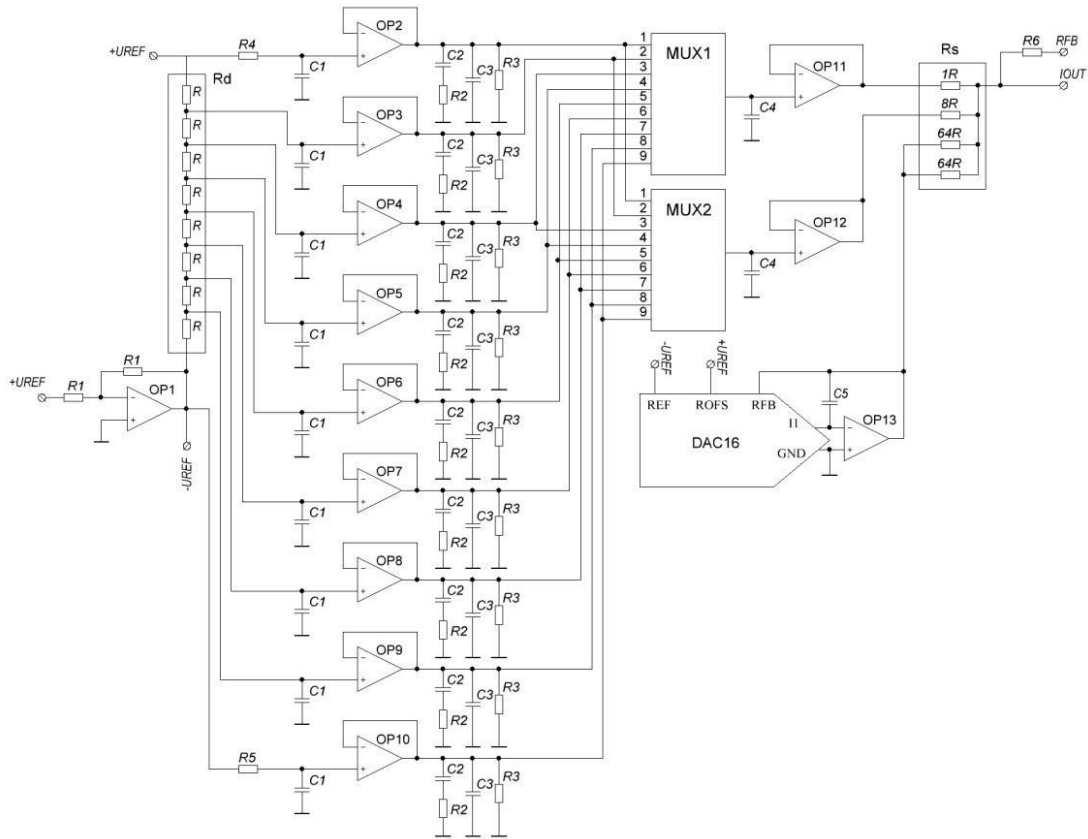
Pētījuma ietvaros tika izveidoti divi rezistīvās matricas varianti. Katrā no tām bija realizēti rezistori ar atgriezenisko saiti, rezistoru grupa ar lielāko izlādi (3 lielākās izlādes izkliedētas uz 7 rezistoriem) un R2R struktūra zemākajā daļā (15 izlādes). Abi matricas varianti pieprasa regulēšanu ar lāzera palīdzību.

Matricas atšķiras ar konstruktīvo risinājumu. Rezistori, kas paredzēti lāzerpiedzīšanai iedalīti divās grupās – lielajā un mazajā. Lielākā daļa fiksēta, mazākā – pielietota piedzīšanai. Lai uzlabotu rezistoru stabilitāti, tika izmantota “restotā” struktūra tai rezistora daļai, kas paredzēta piedzīšanai. Lai samazinātu lokālās uzsilšanas ietekmi, rezistori tika atdalīti un samaisīti.

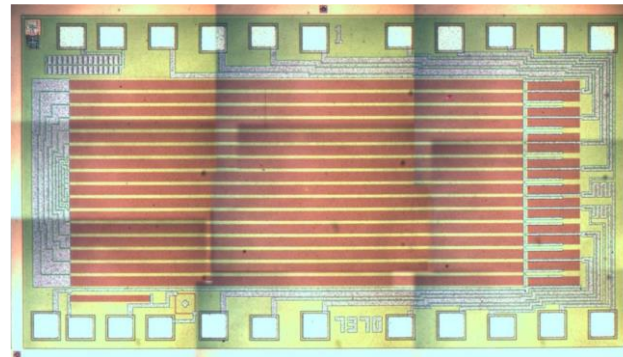
Uztādīšanas laiks komplektācijai, kas izveidota uz šiem kristāliem, ir 5 ms un diferenciālā linearitāte – 14 izlādes līdz lāzerpiedzīšanai, kas tiks veikta nākamajos pētījuma posmos.

Augsta līmeņa audio aparatūrai diskretizācijas frekvence 96 kHz skaitās zemākā robeža.

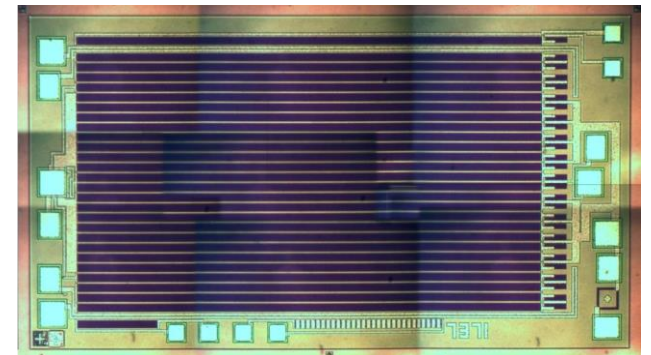
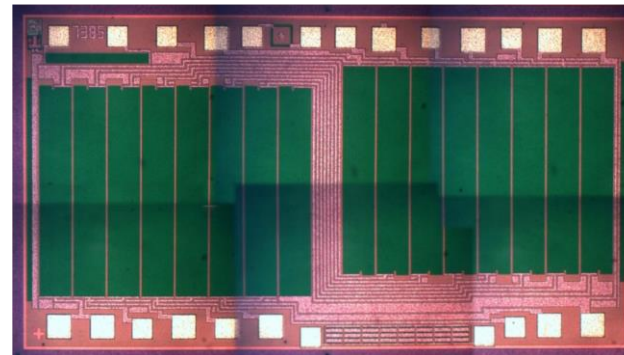
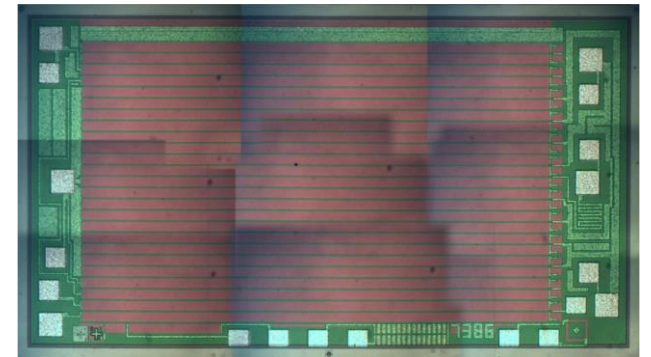
- DAC21



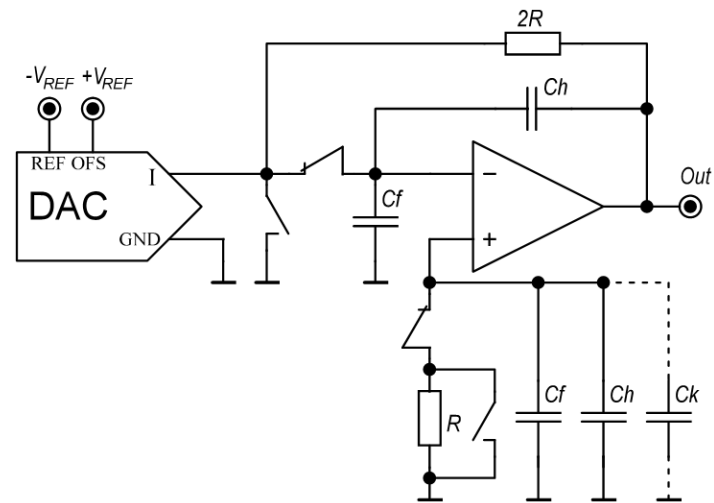
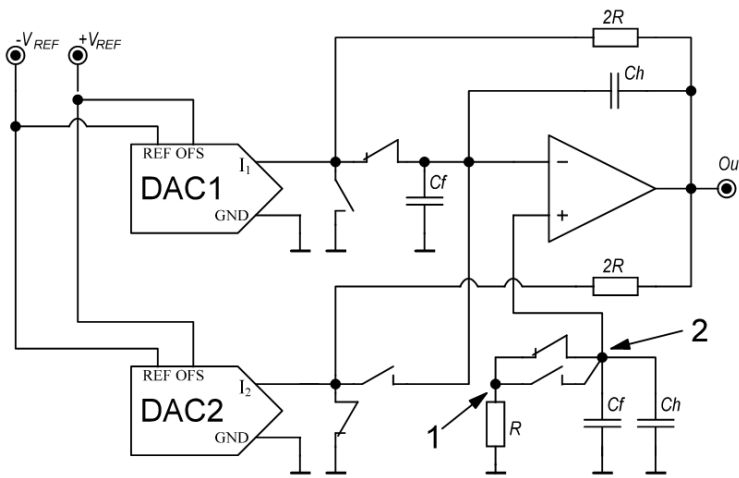
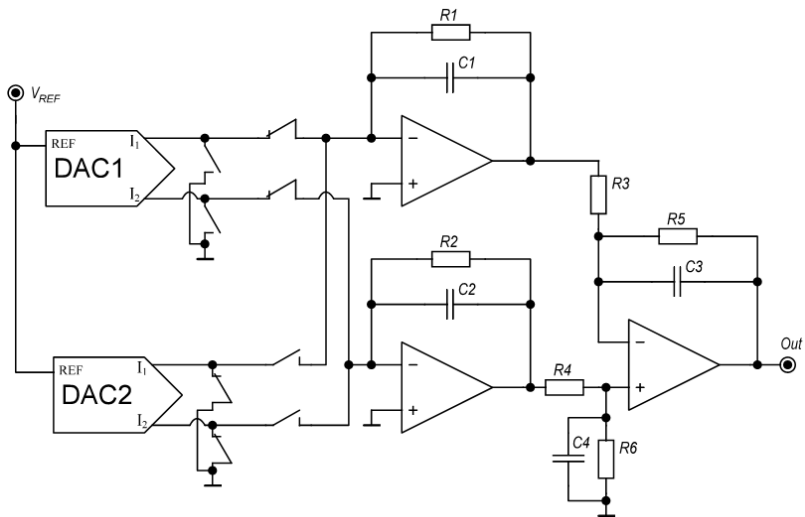
Rezistīvā dalītāja fotogrāfija



Summators



Gličs.



Secinājumi pēc 1 posma DAC izveidi

DAC18 galvenās nepilnības:

- Nepietiekama ātrdarbība – uzstādīšanas ātrums ap 2 ms,
- Augsts gliča līmenis, kas pieprasa, lai degličers ilgu laiku darbojas režīmā HOLD
- Augsta lāzerpiedzīšanas nepieciešamība

Galvenie izvirzītie mērķi, ko nepieciešams sasniegt pētījuma tālākajās darbībās:

- Digitālā vadošā kristāla pārstrāde, lai samazinātu pārslēgšanas laiku līdz 200-500 ns
- R2R matricas optimizācija
- Sasniegt diferenciālo nelinearitāti mazāk nekā 0,25-0,5 LBS un integrālo nelinearitāti mazāk nekā 1-2 LBS

Secinājumi par DAC21

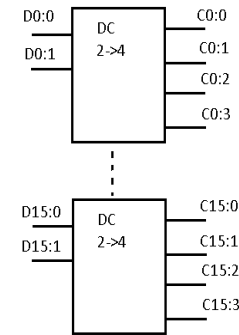
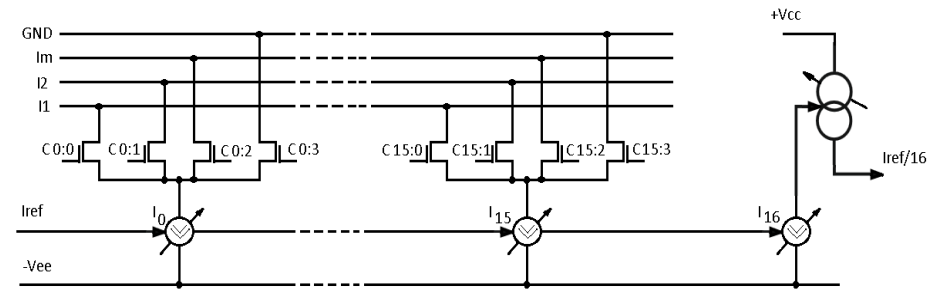
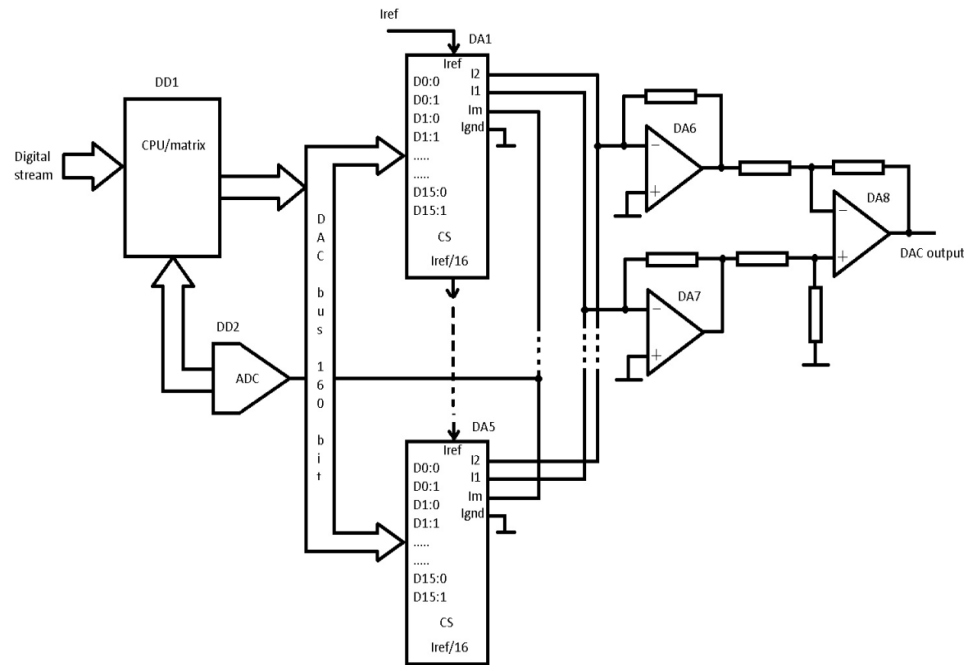
- DAC21 galvenās nepilnības:
- Strāvas dalītājā, atkārtotājā pie dinamiskas izejas slodzes (multipleksora pārslēgšanās) novēroti būtiski izmeši, kas ierobežo maksimālo frekvenci
- Strāvass summators pieprasa augstu rezistoru temperatūras stabilitāti un īpašus tehnoloģiskus risinājumus
- Risinājuma sarežģītības līmenis

Degličeri

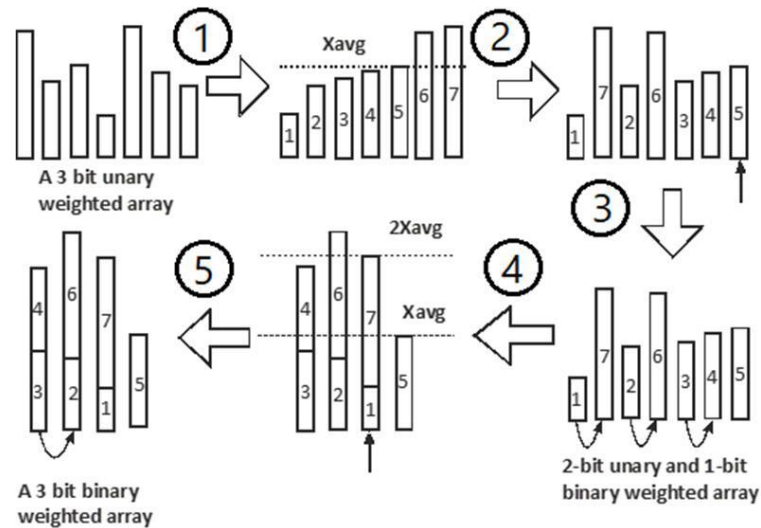
Tā kā nepieciešams ļoti īss degličera atslēgu pārslēgšanās laiks (vēlams mazāk par 1 ns), nepieciešams vienots un integrāls risinājums atslēgām un to vadības loģikai, kas saistīts ar izslēgšanās laika samazināšanu MOS atslēgām.

Posms 2

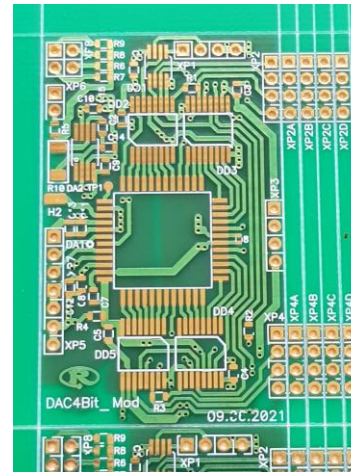
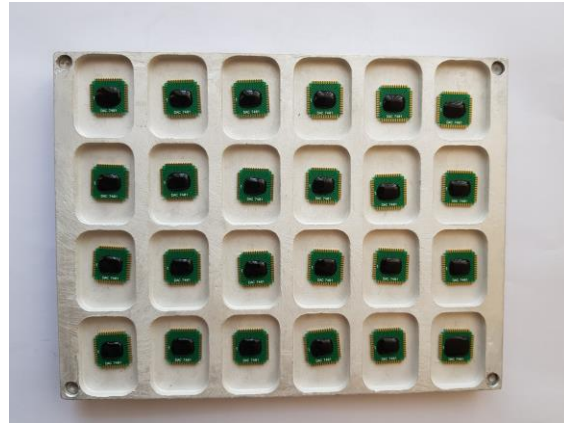
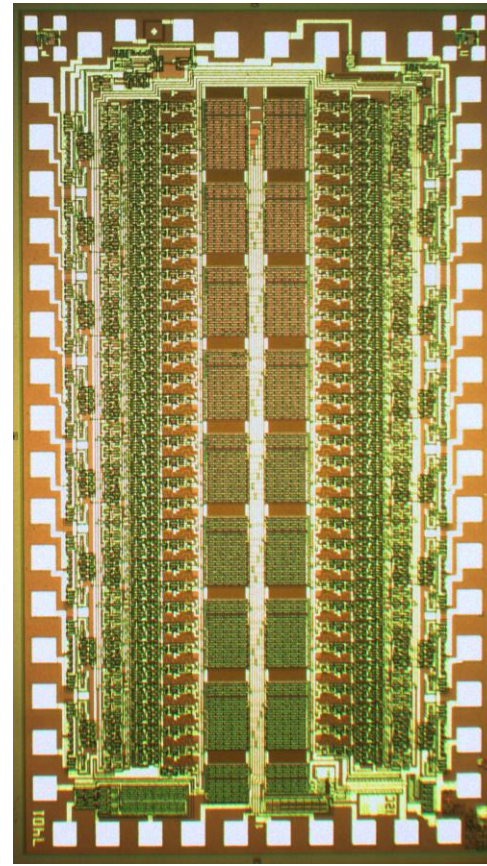
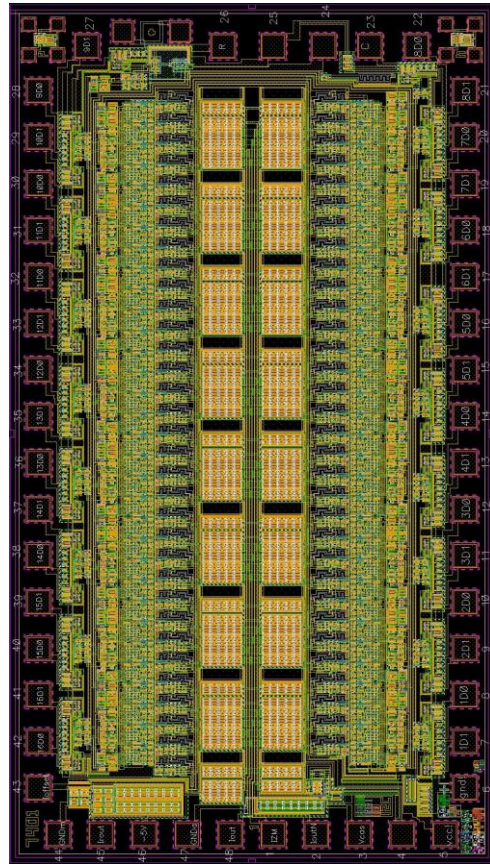
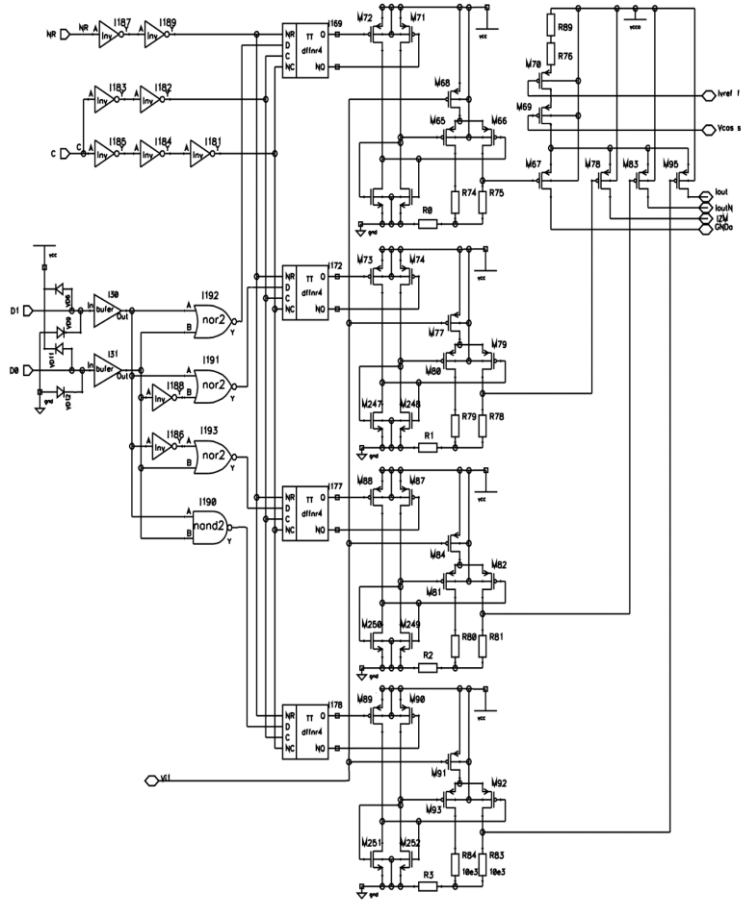
Tā kā pardaudz komponentu nav problēma Hi-End pielietojumam, tika lemts izmantot jaunu sekciju struktūru, izmantojot ārēju lēnu precīzu ADC un procesoru, lai vadītu DAC un nepārtrauktu kalibrēšanu.



OEM (ordered element matching) algorithms

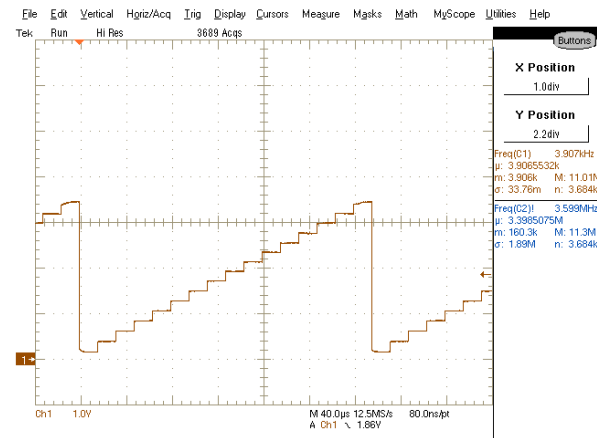
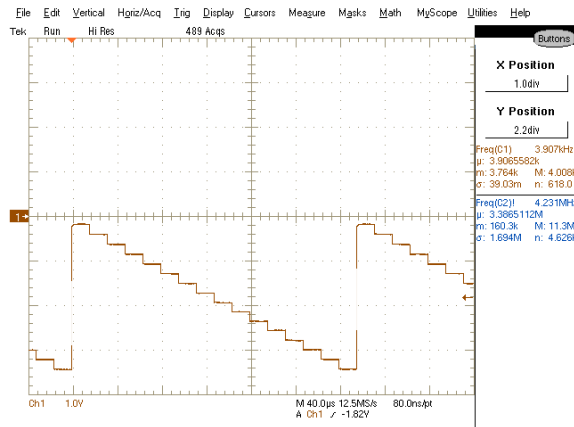


- OEM algoritms (1- mērīšana un šķirošana, 2- izvēle, 3- pirmās kārtas salikšana, 4- izvēle, 5- dubultā salikšana)

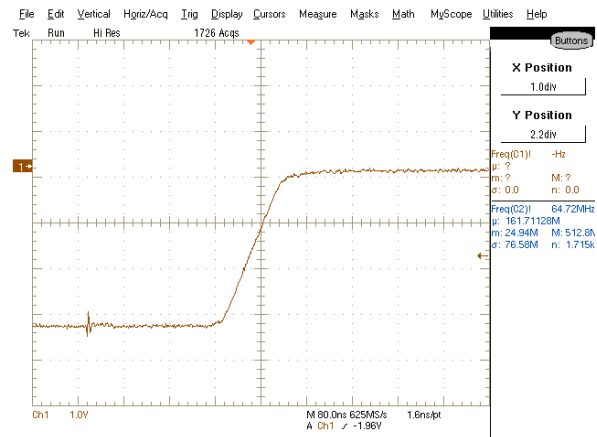
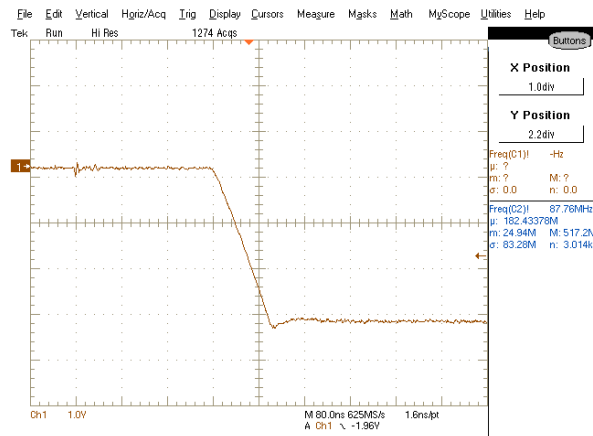


Dinamiskie ipašības

MSB pārslēgšana (augsta sekcija – 16 pakapes)



Pārveidotāja 1 bita pārslēgšana (augsta sekcija)



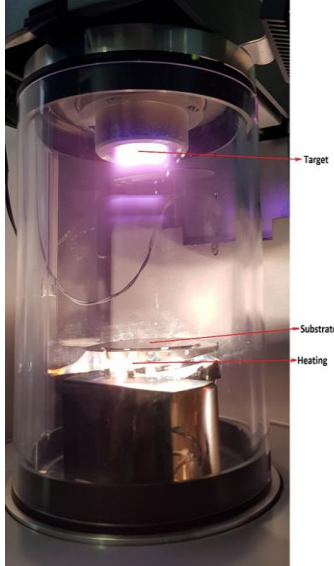
Secinājumi

- Iegūtie rezultāti liecina, ka DAC nozīmīgāko bitu nostādināšanas laiks ir mazāks par 200 ns, atbilst problēmas izklāstam.
- Struktūra un izstrādātais modulis ļauj izveidot DAC ar dinamiski kontrolētu digitālo-analogo pārveidi (ieskaitot laikā)

3.3 Vakuuma tranzistora izstrāde

Darba mērķis ir izveidot emitējošas iekārtas ar nelielu strāvas blīvumu un ar integrācijas iespējām ar pusvadītāju struktūrām.

Ierīču sagatavošana

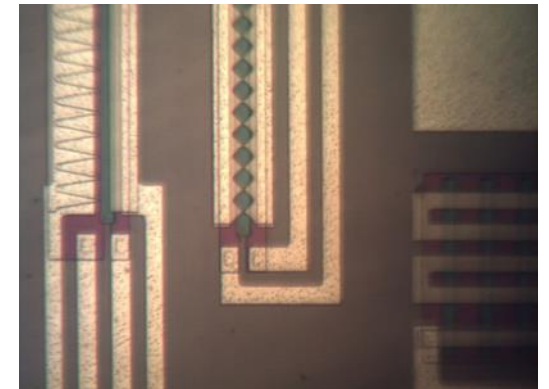
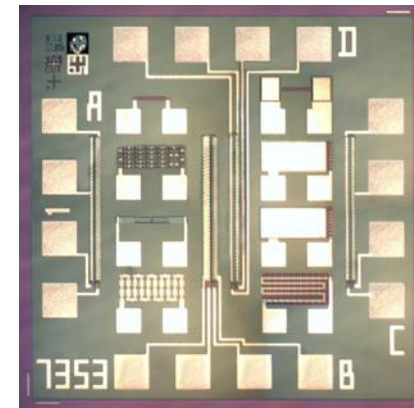
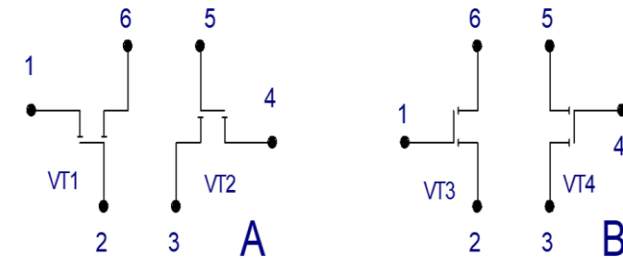


Materiālu izvēle

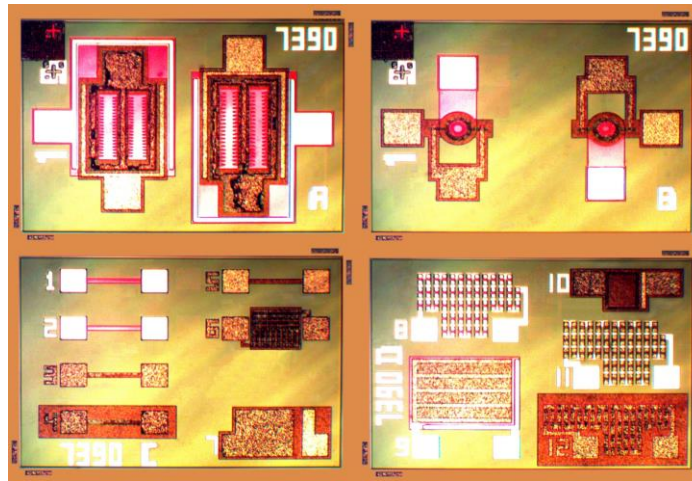
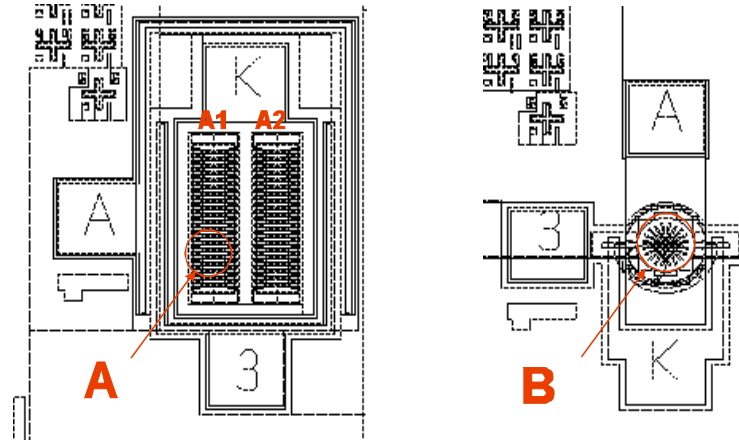
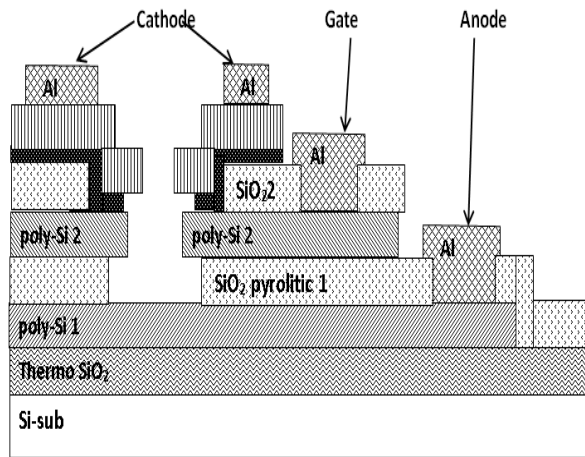
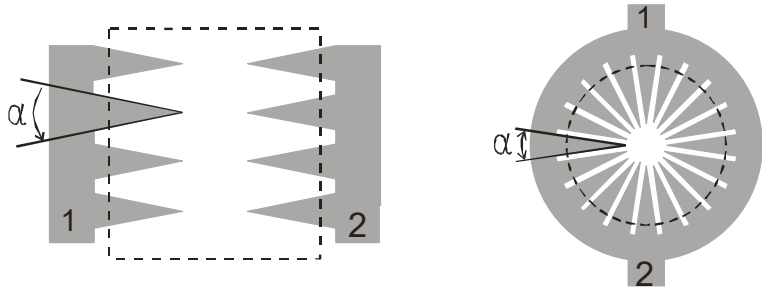
BaCO₃ (99,9%), WB₂ (99,5%), W (99,99 %)



Testēšanas kristāla shēma



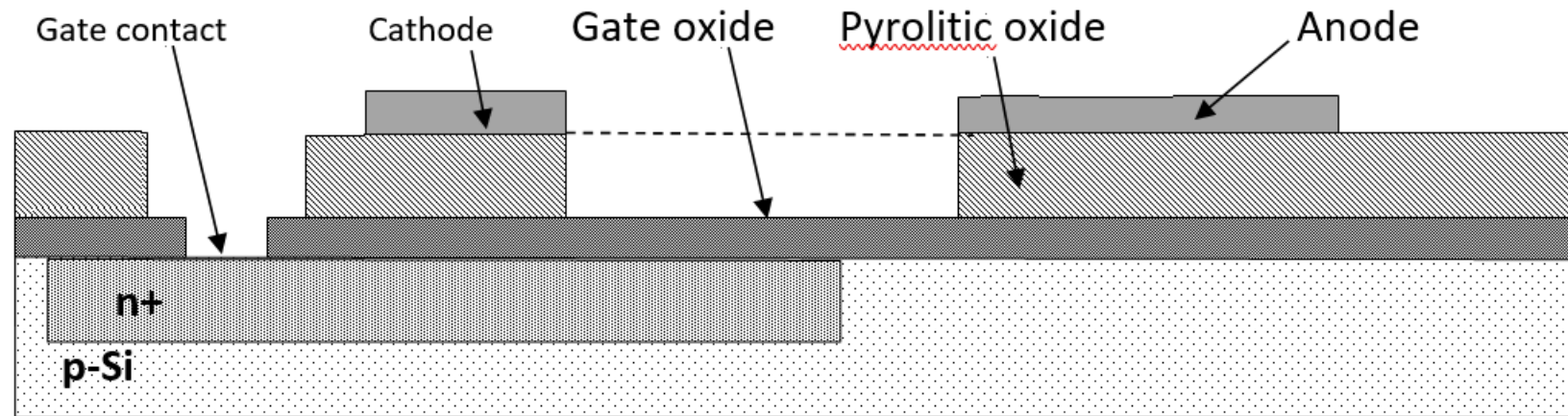
- Vertikāla struktūra



Eksperimenti tika veikti lai noteiktu elektronu izejas darbu (E), kas ir izšķirošais katoda parametrs, no kura ir atkarīga katoda efektivitāte; katoda efektivitāti (N).

Katoda apzīmējums	Rs, ohm/cm ²	d, mkm	E, eV	N, relatīvas vienības (WB ₂ -42-2 paraugam N=1)	Piezīmes par katodu virsmas īpatnībām
W-35-1	3	0,15	4,75	0,464	
W-35-2	3	0,15	4,74	0,456	
W-36-1	3	0,15	4,76	0,415	
W-35-2	3	0,15	4,76	0,409	
WB ₂ -40-1	350	0,15	4,54	0,923	spīdīga malas virsma
WB ₂ -40-2	350	0,15	4,33	3,357	Tumšais plankums centrā
WB ₂ -40-3	350	0,15	4,52	1,543	spīdīga malas virsma
WB ₂ -42-1	20	0,15	4,55	0,927	
WB ₂ -42-2	20	0,15	4,56	1,000	
WB ₂ -43-1	15	0,20	4,54	0,882	
WB ₂ -43-2	15	0,20	4,54	0,839	
WB ₂ -41-1	400	0,15	4,71	0,054	tumša matēta virsma
WB ₂ -41-2	400	0,15	4,67	0,170	tumša matēta virsma

- Struktūra ar «burried Gate» - horizontāla - vertikāla



Secinājumi

Ir izstrādāts, ražots un pārbaudīts liels skaits dažādu vakuuma tranzistoru konstrukciju un materiālu. Lielākā daļa opciju sabruka vai tām bija nepieņemamas noplūdes strāvas.

Dažas opcijas parādīja veikspēju, taču tās nebija izturīgas.

Secinājumi

Veiktā darba rezultātā var izdarīt šādus secinājumus.

1. Audio OpAmp

Ir sasniegti labi rezultāti. Ir saņemtas pozitīvas atsauksmes no patērētājiem, kuri to izmanto Phono-priekšpastiprinātājs, Audio-DAC, jaudas pastiprinātāji. Ir sagatavots risinājums dizaina optimizēšanai. Esošo rezultātu jau ir iespējams popularizēt tirgū.

2. Audio DAC.

Sagatavotajam risinājumam, izstrādājam kodolam, ir augsti parametri. Jāturpina darbs pie tā ieviešanas uz gatavu apakšmoduli vai kā atsevišķu Audio-DAC ierīci.

3. Vakuuma tranzistors.

Mēģinājumi izveidot vakuuma tranzistoru parādīja rezultāta sasniedzamību, bet tajā pašā laikā parādīja nepieciešamību pēc fundamentālas izpētes / darba.